Etude du coefficient d'atténuation en fonction du numéro atomique *Z*

Objectifs expérimentaux

- Mesure de la transmission *T* pour le rayonnement X en fonction du numéro atomique *Z* pour une longueur d'onde fixe en dehors des arêtes d'absorption.
- Etude de la subordination à *Z* du coefficient d'atténuation μ en dehors des arêtes d'absorption.
- Vérification de la loi Z^4 pour le coefficient d'absorption τ.

Notions de base

L'absorption et la diffusion contribuent ensemble à l'atténuation du rayonnement X. Le coefficient d'atténuation linéaire μ est donc constitué du coefficient d'absorption linéaire τ et du coefficient de diffusion linéaire σ:

$$\mu = \tau + \sigma \qquad \text{(I)}.$$

Ces coefficients sont proportionnels à la masse et à la densité ρ du matériau irradié, raison pour laquelle on utilise souvent ledit coefficient de masse

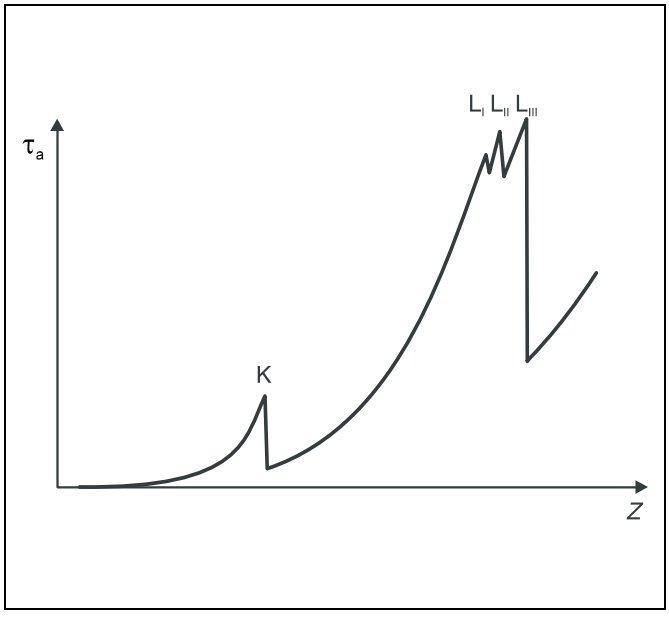
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho},\ \tau_m = \frac{\tau}{\rho},\ \sigma_m = \frac{\sigma}{\rho} \qquad \text{(II)}$$

ou – pour les métaux purs observés ici – les coefficients atomiques ou sections efficaces

$$\mu_a = \mu_m \frac{A}{N_A},\ \tau_a = \tau_m \frac{A}{N_A},\ \sigma_a = \sigma_m \frac{A}{N_A} \qquad \text{(III)}$$

A: masse atomique relative

$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$: nombre d'Avogadro



Comme pour l'équation (I), on a

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m \qquad \text{(IV)}$$

et

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a \qquad \text{(V)}.$$

L'absorption du rayonnement X se base essentiellement sur l'ionisation des atomes qui délivrent un électron d'une couche atomique intérieure. La section efficace d'absorption τ_a dépend par conséquent fortement de l'énergie d'excitation des atomes et donc du numéro atomique *Z* (voir fig. 1). En dehors des arêtes d'absorption pour lesquelles l'énergie quantique $h\nu$ du rayonnement X correspond justement à l'énergie de liaison *E* des électrons, on a en bonne approximation la relation suivante pour le rayonnement X monochromatique d'une longueur d'onde λ:

$$\tau_a = C_2 \cdot Z^4 \qquad \text{(VI)}.$$

Cette relation est vérifiée lors de l'expérience par des mesures de la transmission sur les métaux Al, Fe, Cu, Zr et Ag pour la longueur d'onde λ = 40 pm qui est en dessous des arêtes d'absorption des éléments (voir tab. 1).

Tab. 1: Tab. 1: Numéro atomique Z des métaux étudiés et arête d'absorption λ_K de la couche K [1]

Elément	*Z*	$\frac{\lambda_K}{\text{pm}}$
Al	13	796,7
Fe	26	174,3
Cu	29	138,1
Zr	40	68,9
Ag	47	48,6

Fig. 1 Coefficient d'absorption en fonction du numéro atomique pour une longueur d'onde fixe du rayonnement X (schéma)
K: Arête d'absorption de la couche K
L_I, L_{II}, L_{III}: Arêtes d'absorption de la couche L

Matériel

1 appareil à rayons X	554 811
1 tube compteur à fenêtre pour rayonnements α, β, γ et X	559 01
1 lot de films d'absorption	554 832

Conseils de sécurité

L'appareil à rayons X respecte les consignes relatives à la construction d'un appareillage à rayons X pour l'enseignement et d'un appareil à protection totale et est homologué en tant que tel (d'après le règlement allemand sur les rayonnements X).

Grâce aux mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de 1 μSv/h, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.

- Avant la mise en service, s'assurer du bon état de l'appareil à rayons X et vérifier que la haute tension est bien coupée à l'ouverture des portes coulissantes (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.

Eviter une surchauffe de l'anode dans le tube à rayons X Mo.

- A la mise en marche de l'appareil à rayons X, vérifier si le ventilateur dans la partie tube fonctionne.

Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques.

- Ne pas bloquer le bras de cible et le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.

Pour l'exploitation, on profite du fait que la section de diffusion σ_a pour la longueur d'onde choisie est nettement plus petite que la section relative d'absorption et peut être approximativement évaluée par

$$\sigma_a = 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \qquad \text{(VII)}$$

D'après les équations (II) à (VII), on a, après quelques transformations, l'équation déterminative suivante pour la section relative d'absorption:

$$\tau_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_A} - 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \qquad \text{(VIII)}$$

La transmission

$$T = \frac{R}{R_0} \qquad \text{(IX)}$$

R_0: taux de comptage devant l'atténuateur
R: taux de comptage derrière l'atténuateur

du matériau irradié est mesurée pour une longueur d'onde λ fixe du rayonnement X. En appliquant la loi de Lambert

$$T = e^{-\mu x} \qquad \text{(X)}$$

x: épaisseur de l'atténuateur

le coefficient d'atténuation linéaire μ est calculé et à partir de celui-ci, la section relative d'absorption τ_a conformément à l'équation (VIII):

$$\tau_a = \frac{-\ln T}{\rho \cdot x} \cdot \frac{A}{N_A} - 0{,}2\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot \frac{A}{N_A} \qquad \text{(XI)}$$

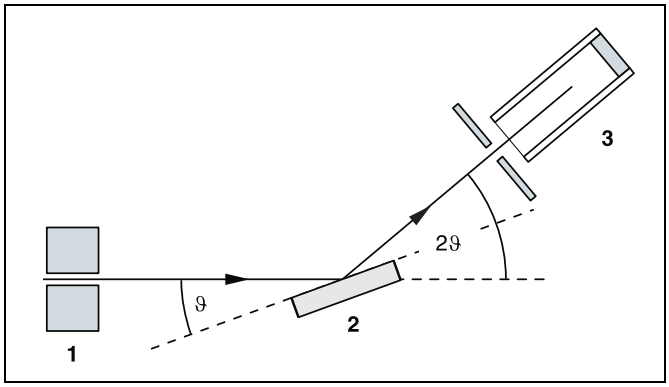


Fig. 2 Diffraction du rayonnement X sur un monocristal et pour le couplage 2ϑ entre l'angle du tube compteur et l'angle de diffusion (angle de brillance)
1 collimateur, **2** monocristal, **3** tube compteur

On utilise un goniomètre avec cristal de NaCl et un tube compteur de Geiger-Müller en disposition de Bragg pour la sélection de la longueur d'onde. Le cristal et le tube compteur sont orientés dans un couplage 2ϑ par rapport au faisceau de rayons X incident; cela signifie que le tube compteur est à chaque fois tourné d'un angle deux fois plus grand que le cristal (cf. fig. 2).

Conformément à la loi de la réflexion de Bragg, la longueur d'onde

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\vartheta \qquad \text{(XII)}$$

d = 282,01 pm: écartement des plans du réseau du NaCl

correspond à l'angle de diffusion ϑ dans le premier ordre de diffraction.

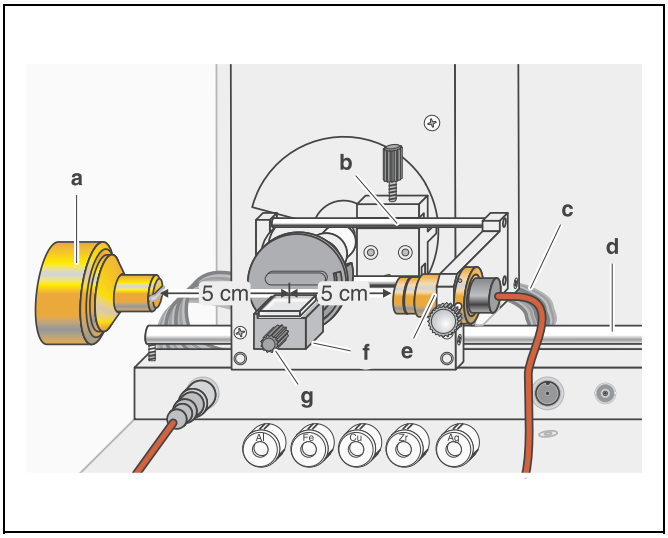


Fig. 3 Montage expérimental pour l'étude de l'influence du numéro atomique sur le coefficient d'atténuation

Montage

Réalisation de la disposition de Bragg:

Le montage est représenté sur la fig. 3. La marche à suivre est la suivante (voir aussi mode d'emploi de l'appareil à rayons X):

– Placer le collimateur dans le logement du collimateur **(a)** (faire attention à la rainure de guidage).
– Fixer le goniomètre sur les barres de guidage **(d)** de manière à avoir une distance s_1 d'environ 5 cm entre le diaphragme à fente du collimateur et le bras de cible. Enficher le câble plat **(c)** pour la commande du goniomètre.
– Enlever le capuchon protecteur du tube compteur à fenêtre, placer le tube compteur à fenêtre dans le logement du capteur **(e)** et brancher le câble du tube compteur à la douille GM-Tube.
– En déplaçant le porte-capteur **(b)**, régler une distance s_2 d'environ 5 cm entre le bras de cible et le diaphragme à fente du logement pour capteur.
– Monter le porte-cible avec le plateau pour cible.
– Desserrer la vis moletée **(g)**, poser le cristal de NaCl à plat sur le plateau pour cible **(f)**, soulever prudemment le plateau pour cible avec le cristal jusqu'à la butée et serrer la vis moletée en faisant bien attention (visser bien dans l'axe).
– Eventuellement ajuster la position zéro du goniomètre (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).

N.B.:

Les cristaux de NaCl sont hygroscopiques et fragiles:

Ranger le cristal dans un endroit aussi sec que possible, éviter si possible toute sollicitation mécanique sur le cristal, ne s'emparer du cristal que par les fronts.

Réalisation

Les taux de comptage ne devraient pas dépasser 600 impulsions à la seconde pour ainsi pouvoir renoncer à une correction du temps mort.

– Sélectionner une haute tension du tube U = 35,0 kV, un courant d'émission I = 0,60 mA.
– Choisir un pas angulaire $\Delta\beta = 0{,}0°$.
– Activer le bouton-poussoir Coupled pour le couplage 2ϑ de la cible et du capteur et régler manuellement l'angle de la cible sur 4,1°.

Pour U = 35 kV, la longueur d'onde limite du rayonnement de freinage vaut λ_{min} = 35,4 pm (voir par ex. l'expérience P6.3.3.3). Cette valeur correspond à un angle de diffraction de 3,60° dans le premier ordre de diffraction. L'angle de la cible 4,1° sélectionné correspond à la longueur d'onde λ = 40,3 pm. Celle-ci est au-delà de la longueur d'onde limite λ_{min} et en-dessous des arêtes K λ_K données dans le tableau 1.

– Sélectionner Δt = 20 s comme temps de mesure par pas angulaire.
– Lancer la mesure avec le bouton-poussoir SCAN et une fois le temps de mesure écoulé, appeler le taux de comptage moyen avec le bouton-poussoir Replay. Relever le résultat.
– Augmenter le temps de mesure par pas angulaires à Δt = 100 s.
– Monter le film en Al du lot de films d'absorption (554 832) sur le logement pour capteur **(e)** du goniomètre, lancer la nouvelle mesure avec le bouton-poussoir SCAN, appeler le taux de comptage moyen avec le bouton-poussoir Replay, le diviser par le taux de comptage mesuré sans atténuateur pour le calcul de la transmission T et relever le résultat.
– Remplacer successivement le film en Al par les films en Fe, Cu, Zr et Ag et réaliser d'autres mesures.

Exemple de mesure

Tab. 2: Taux de comptage R mesurés et transmissions T des films utilisés (U = 35 kV, I = 0,6 mA, β = 4,1°)

Atténuateur	$\frac{R}{s^{-1}}$	T
sans	607,3	
Al	509,3	0,839
Fe	33,86	0,0558
Cu	327,0	0,538
Zr	280,6	0,462
Ag	107,0	0,176

Tab. 3: Paramètres des films utilisés

Elément	Z	$\frac{\rho}{g \cdot cm^{-3}}$	$\frac{A}{g \cdot mol^{-1}}$	$\frac{x}{cm}$
Al	13	2,70	26,98	0,050
Fe	26	7,86	55,85	0,050
Cu	29	8,92	63,55	0,007
Zr	40	6,49	91,22	0,005
Ag	47	10,50	107,87	0,005

Exploitation

Le tableau 2 restitue les valeurs déterminées pour la transmission T. Le tableau 3 comporte les principaux paramètres pour l'exploitation ultérieure. Par application de l'équation (XI), on peut calculer la section relative d'absorption τ_a (voir tableau 4 et fig. 4). Pour vérifier la loi Z^4, on calcule les termes $\ln(\tau_a / 10^{-24}\ cm^2)$ et $\ln Z$, on représente la section relative d'absorption sous la forme $\ln \tau_a = f(\ln Z)$ puis on modellise une droite de régression (voir fig. 5).

Tab. 4: Section relative d'absorption τ_a des éléments étudiés

Elément	Z	$\frac{\tau_a}{10^{-24}\ cm^2}$
Al	13	49,44
Fe	26	662,7
Cu	29	1025
Zr	40	3574
Ag	47	5888

Résultat

En dehors des arêtes d'absorption, la section relative d'absorption pour une longueur d'onde constante peut être représentée sous la forme

$\ln \tau_a = A \cdot \ln Z + B$.

La pente de la droite A a approximativement la valeur 4, d'où la validité de la loi Z^4:

En dehors des arêtes d'absorption, la subordination de la section relative d'absorption atomique au numéro atomique Z pour le rayonnement X monochromatique est décrite de manière approximative par le rapport

$\tau_a = C_2 Z^4$.

Bibliographie

[1] C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 7th Edition, 1978, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Fig. 4 Section relative d'absorption τ_a en fonction du numéro atomique Z pour la longueur d'onde λ = 40 pm

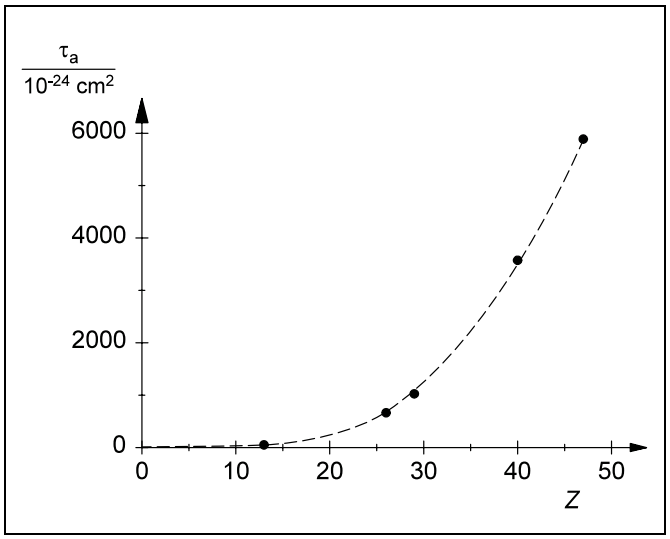
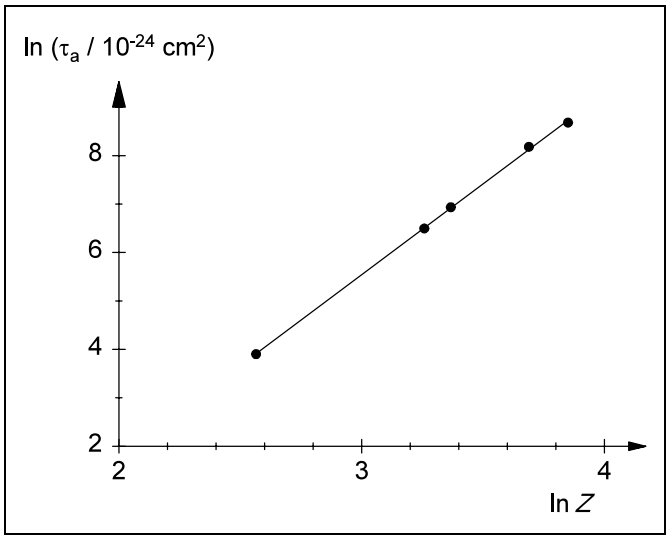


Fig. 5 Section relative d'absorption τ_a dans la représentation $\ln \tau_a$ en fonction de $\ln Z$
Pente de la droite: 3,75



© by Leybold Didactic GmbH
Printed in the Federal Republic of Germany
Technical alterations reserved